

Limites à la croissance dans le cadre d'un cycle naturel

M. Germain

Discussion Paper 2011-8

Institut de Recherches Économiques et Sociales
de l'Université catholique de Louvain



Limites à la croissance dans le cadre d'un cycle naturel

Marc Germain*

Mars 2011

Résumé

Cet article s'interroge sur les limites bio-physiques à la croissance économique, et en particulier sur les conditions susceptibles de conduire à l'effondrement de l'économie. L'intention est d'étudier comment la naissance et la croissance (à travers l'accumulation du capital) d'une économie est susceptible d'affecter le fonctionnement de son environnement modélisé sous la forme d'un cycle naturel. L'analyse concerne non seulement les équilibres à long terme du système formé par l'économie et son environnement, mais aussi la dynamique transitoire.

Le modèle est susceptible de comportements variés, pouvant conduire à des équilibres de long terme très différents. Partant de l'équilibre du cycle naturel sans économie, la naissance et la croissance d'une économie au sein du cycle naturel peut conduire selon la valeur des paramètres à (i) un nouvel équilibre de long terme qualitativement similaire à celui d'origine, (ii) un nouvel équilibre de long terme qualitativement dégradé (sur le plan environnemental) par rapport à celui d'origine, ou (iii) la "mort" (c-à-d l'effondrement irréversible) du système cycle naturel - économie. Dans le cas (ii), la convergence vers un équilibre de long terme dégradé peut se faire après un effondrement transitoire du capital et de la production, effondrement qui n'implique donc pas la "mort" du système (comme dans le cas (iii)).

Un progrès technique permettant de dématérialiser la production, ce qui ceteris paribus est favorable à l'environnement, réduit aussi les coûts d'extraction et stimule l'accumulation du capital, ce qui est négatif pour l'environnement. Les simulations montrent que le deuxième effet l'emporte sur le premier, et que la dégradation de l'environnement est d'autant plus forte que progrès est élevé. Dans certains cas, un progrès technique trop élevé peut déstabiliser le système et le conduire vers une issue catastrophique.

*EQUIPPE, Université de Lille-3 et IRES, Université de Louvain. L'auteur remercie vivement Jean-François Fagnart et Nicolas Schtickzelle pour leurs utiles commentaires et suggestions.

Abstract

This paper is about bio-physical limits to growth and in particular about the conditions under which an economy may collapse. We study how the birth and growth of an economy could affect its environment modeled as a natural cycle. The analysis is not only concerned by the long term equilibria of the system formed by the economy and its environment, but also by the transitory dynamics.

Depending of the value of the structural parameters of the system, we show that it can behave in different ways and be characterized by different long term equilibria: starting from the equilibrium of the natural cycle without economy, the birth and growth of the economy in the framework of the natural cycle can lead to (i) a new long term equilibrium qualitatively similar to the starting point, (ii) a new long term equilibrium with a damaged environment, or (iii) the irreversible collapse of the system formed by the natural cycle and the economy. In case (ii), the convergence to a damaged long term equilibrium can follow a transitory but partly reversible collapse, contrary to what occurs in case (iii).

We finally introduce a technical progress that dematerialises production and is thus *ceteris paribus* favorable to the environment. However it also has a negative impact on the quality of the environment since it stimulates capital accumulation. Simulations show that the second effect dominates, and that the damage to the environment will be higher the higher the technical progress. In certain cases, a too high technical progress can lead to a catastrophic end.

JEL classification : E1, O41, Q0, Q56, Q57.

Mots clés : limites à la croissance, conservation de la matière, cycle naturel, effondrement.

1 Introduction

Le but de l'analyse est de s'interroger sur les limites bio-physiques à la croissance économique, et en particulier sur les conditions susceptibles de conduire à l'effondrement de l'économie. Une particularité de l'analyse est d'étudier non seulement le ou les équilibres à long terme du système formé par l'économie et son environnement, mais aussi de mettre l'accent sur la dynamique transitoire. En effet, la question d'un équilibre harmonieux entre une économie et son environnement naturel ne se pose pas seulement à long terme, mais aussi en terme de transition. Par exemple, la trajectoire d'une société trouvant un équilibre harmonieux avec son environnement après un effondrement brutal de la moitié de sa population n'est pas acceptable.

Parmi les différents travaux récents qui se sont intéressés à cette problématique pour les sociétés contemporaines, on peut citer notamment l'ouvrage bien connu de Meadows et al (2004), celui de Diamond (2006) et l'article de Taylor (2009)¹.

¹Il existe également de nombreuses études consacrées à l'effondrement de civilisations

La méthode suivie ici présente l'originalité suivante. Contrairement à l'approche habituelle de la théorie économique de la croissance avec environnement, qui se contente le plus souvent d'ajouter un stock de ressource naturelle (renouvelable ou non) et/ou un puit de pollution à l'économie, l'idée est ici de modéliser une économie au sein d'un environnement sous forme d'un cycle naturel (par exemple celui du carbone). L'intention est, dans un premier temps, d'étudier la dynamique propre du cycle naturel, et dans un deuxième temps, de voir comment la naissance et la croissance d'une économie sont susceptibles d'affecter le fonctionnement du cycle.

Le cycle naturel est constitué de deux stocks de matière, l'une sous forme dégradée (à haute entropie) et l'autre sous forme "noble" (à basse entropie). La matière circule constamment entre les deux stocks. D'une part, la ressource "noble" se dégrade naturellement en matière dégradée. D'autre part, grâce à l'énergie du soleil, l'environnement naturel recycle la matière dégradée et la transforme en matière "noble". L'économie vient se greffer sur le cycle naturel, et pour son fonctionnement, exploite la ressource "noble" et la transforme en déchets qui retournent au stock de matière dégradée. A partir d'un certain niveau (correspondant à la capacité de charge de l'environnement), la pollution humaine (c-à-d le flux de déchets) est susceptible d'affecter négativement la capacité de l'environnement à assurer le recyclage naturel. Mais si la pollution diminue, la capacité de recyclage de l'environnement peut se régénérer, du moins tant que celle-ci demeure au dessus d'un certain seuil. En dessous de ce seuil (que l'on peut qualifier de catastrophique), l'environnement se dégrade et sa capacité de recyclage tend irréversiblement vers zéro.

Le système global constitué par le cycle naturel et l'économie est ouvert en terme d'énergie et fermé en terme de matière². L'économie se greffe donc dans un cadre écologique plus large. Le postulat (réaliste) est que l'économie ne pourrait exister par elle-même, alors que le cycle naturel a sa dynamique propre et peut fonctionner de façon autonome (c-à-d sans économie).

En outre, à la différence d'une approche malthusienne de l'effondrement de sociétés (à l'exemple de Diamond (2006) et Taylor (2009)), l'accent sera mis ici sur l'accumulation du capital comme cause première de la croissance économique, et éventuellement, de son effondrement. En ce sens, la présente étude se situe plutôt dans la lignée de Meadows et al. (2004)³. Cependant, contrairement au modèle de ces derniers qui ne repose pas sur des comportements microéconomiques explicites, la croissance de l'économie est induite ici par les

passées. Pour l'Ile de Pâques, outre Diamond déjà cité, on peut mentionner Brander et Taylor (1997). Diamond étudie d'autres sociétés, dont les Mayas et les Vikings du Groenland. Citons également le livre de Bois (2000) consacré au Moyen Age européen. Le lecteur intéressé trouvera dans les bibliographies de ces contributions de nombreuses autres références.

²La matière est donc conservée au sein du système. Le principe de conservation de la matière est le plus souvent ignoré par la littérature relative à la croissance et à l'environnement. Quelques exceptions sont Akao et Managi (2007), Fagnart et Germain (2010), Germain (1991), Krysiak et Krysiak (2003) et Krysiak (2006)

³Chez ces auteurs, la population est endogène et constitue, à côté de l'accumulation du capital, le deuxième moteur de la croissance. Son rôle est cependant susceptible d'être atténué par la transition démographique qui stabilise la population.

comportements de maximisation de l'utilité par les consommateurs et du profit par les producteurs.

L'analyse de la dynamique transitoire étant en général complexe (surtout quand les phénomènes analysés sont non-linéaires), l'approche suivie ici a donc visé à la simplification de la modélisation en réduisant autant que possible la dimension du modèle, que ce soit au niveau du cycle naturel ou de l'économie.

Pour avoir des solutions complètes du modèle (c-à-d y compris la phase transitoire), le modèle a été résolu numériquement, en faisant surtout varier deux paramètres : la propension à épargner qui conditionne l'accumulation du capital, et la sensibilité de l'environnement à la pollution. L'état initial du système se confond avec l'équilibre du cycle naturel sans économie. En se développant, l'économie finit par se rapprocher de la capacité de charge de l'environnement, qu'elle peut éventuellement dépasser.

Comme le montrent les simulations numériques présentées dans cet article, le dépassement est d'autant plus profond que la propension à épargner est élevée, et l'*impact* de ce dépassement sur l'environnement sera d'autant plus grave que celui-ci est sensible à la pollution. Le modèle est en effet susceptible de comportements variés, pouvant conduire à des équilibres de long terme très différents. En résumé, partant d'un équilibre du cycle naturel sans économie, l'introduction et la croissance d'une économie au sein du cycle naturel peut conduire selon la valeur des paramètres à (i) un nouvel équilibre de long terme qualitativement similaire à celui d'origine, (ii) un nouvel équilibre de long terme qualitativement dégradé (sur le plan environnemental) par rapport à celui d'origine, ou (iii) la "mort" (c-à-d l'effondrement *irréversible*) du système cycle naturel - économie.

Il importe de souligner que pour certaines valeurs des paramètres, la convergence vers un équilibre de long terme dégradé (cas (ii) ci-dessus) se fait après un effondrement *transitoire* du capital et de la production, effondrement qui n'implique donc pas la "mort" du système (comme dans le cas (iii)).

Certaines simulations analysent les effets d'un progrès technique permettant de dématérialiser la production, ce qui est a priori favorable à l'environnement. Elles mettent cependant en évidence qu'un tel progrès est susceptible d'avoir des effets pervers conduisant au final à la dégradation de l'environnement et, dans certains cas, à une issue catastrophique.

La structure du papier est la suivante. La section 1 décrit le cycle naturel, et plus précisément la dynamique des stocks de matières "noble" et dégradée. La section 2 intègre l'économie dans le cycle naturel. On y présente en particulier la technologie et le comportement des consommateurs et des producteurs. Dans la section 3, on calcule les différents équilibres stationnaires possibles au sein de chaque régime. La section 4 présente l'ensemble des simulations numériques. La conclusion reprend les principaux résultats et propose l'une ou l'autre piste de développement possible.

2 Le cycle naturel

L'ensemble du système cycle naturel - économie est décrit par la Figure 1⁴. Le cycle est fermé en terme de matière et ouvert en terme d'énergie (à l'exemple de la biosphère). Au sein du cycle naturel, la matière se trouve sous deux formes : -sous la forme d'une ressource "noble" (R), suffisamment concentrée pour être économiquement exploitable;
- sous la forme d'une ressource "dégradée" (D), à haute entropie, non exploitable économiquement.

Dans le cadre du modèle très schématisé présenté ici⁵, les stocks R et D doivent être compris dans un sens large. Ainsi, R comprend notamment les énergies fossiles, les minerais hautement concentrés, la matière organique,... tandis que D comprend notamment les minerais sous formes dispersées, les déchets, le CO₂,...

La matière circule constamment entre les deux stocks R et D . Grâce à l'énergie du soleil, l'activité de l'environnement se traduit par un recyclage naturel allant de D à R . La capacité de l'environnement à assurer ce recyclage est mesurée par E . En l'absence d'intervention humaine ou si les impacts de celles-ci ne sont pas trop grands (cfr. infra), cette capacité s'ajuste à un niveau naturel E_M , exogène et constant. La quantité de matière recyclée allant de D à R (V) est une fonction croissante de E : $V = f(E)$. Par souci de simplicité, on supposera que $V = E$. D'un autre côté, la ressource "noble" se dégrade selon des mécanismes naturels à un taux constant δ_R ($0 < \delta_R < 1$).

Le cycle naturel étant fermé, la matière totale qui y est contenue est constante (en vertu de la loi de conservation de la masse). *En l'absence d'économie*, les équations décrivant les évolutions de D et de R s'écrivent :

$$R_t - R_{t-1} = E_M - \delta_R R_{t-1} \quad (1)$$

$$M = D_t + R_t \quad (2)$$

où M est une constante strictement positive qui représente la masse totale dans le système. Comme D et R sont positifs, on a nécessairement $0 \leq D, R \leq M$.

3 L'économie

La partie économique du modèle est une version simplifiée de Fagnart et Germain (2010). Soit un continuum de firmes monopolistiques définies sur l'intervalle $[0, 1]$. La firme $j \in [0, 1]$ est la seule à produire le bien j , qui peut être destiné

⁴Ce modèle consiste en une simplification d'un modèle de photosynthèse-respiration-recyclage aquatique proposé par Odum (2005, p.16). Ce modèle apparaît également sous forme graphique dans Pillet et Odum (1987, p. 37 et sv.). Les simplifications ont consisté à (i) fermer le modèle (pas d'échange de matière avec l'extérieur) et (ii) se limiter au cycle du carbone et ignorer l'oxygène.

⁵Un schéma plus élaboré ferait apparaître la circulation de l'énergie au sein du cycle, et sa dissipation au niveau de chacun des transformateurs (environnement, dégradation naturelle et économie). Le schéma illustré par la Figure 1 est cependant suffisant pour le propos du présent article.

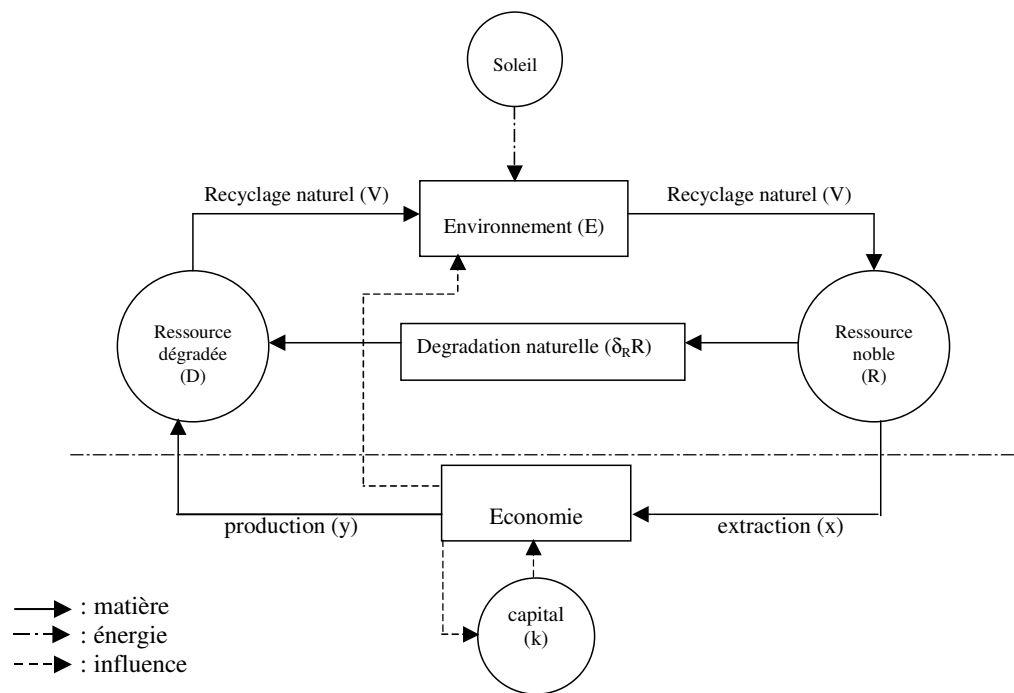


Figure 1: schéma général

à la consommation ou à l'investissement. Les facteurs de production sont la ressource naturelle "noble" (R) et le capital physique (k).

Pour produire la quantité y_{jt} du bien à la période t , la firme j a besoin d'une quantité x_{jt} de la ressource naturelle :

$$x_{jt} = \mu_t y_{jt} \quad (3)$$

La variable exogène μ_t mesure le contenu en matière de la production. En ce sens, elle décrit la dépendance de la technologie à l'égard de la ressource naturelle. Elle est commune à toutes les firmes et décroît en fonction du progrès technique (exogène) qui rend le processus de production moins consommateur de ressource. On suppose que ce progrès technique est borné, au sens où un état de dématérialisation complète de la production (c-à-d qui permettrait de produire une unité du bien avec une quantité infinitésimale de ressource) est inatteignable. μ est donc borné inférieurement par une quantité strictement positive⁶ :

$$\mu_t \geq \underline{\mu} > 0 \quad (4)$$

La ressource "noble" est en accès libre. Son extraction et sa transformation en biens exige cependant du capital physique. Pour extraire et transformer la quantité x_{jt} , la firme a besoin d'une quantité de capitale k_t donnée par :

$$k_{jt} = \frac{ax_{jt}}{1 - \frac{X_t}{R_{t-1}}} \quad (5)$$

où R_{t-1} est le stock de ressource "noble" à la fin de la période $t - 1$ (ou de façon équivalente au début de la période t) et X_t est la quantité totale de ressource "noble" utilisée par l'ensemble des firmes pendant la période. Le capital nécessaire pour exploiter une unité de ressource augmente donc avec le taux d'exploitation de celle-ci. a est une constante (exprimée en inverse d'unité de masse).

3.1 Le comportement du consommateur

On considère un agent représentatif à longue durée de vie qui consomme les biens finaux et accumule un patrimoine financier. Il reçoit l'ensemble des revenus générés par la production sous la forme d'intérêts et de profits.

⁶Fagnart et Germain (2010) postulent un progrès technique endogène et distinguent explicitement entre qualité et quantité des biens produits, ce qui n'est pas le cas ici. En revanche, on les suit au niveau de la contrainte (4), contrairement à de nombreuses contributions qui supposent (explicitement ou non) que $\underline{\mu} = 0$. Cette hypothèse est cruciale pour engendrer une croissance quantitative indéfinie dans le cadre d'un monde fini. Cfr. l'article de ces auteurs pour plus de développements concernant les enjeux liés à cette hypothèse.

Les préférences du consommateur sont représentées par la fonction d'utilité intertemporelle suivante (supposée logarithmique par soucis de simplicité) :

$$\sum_{t=1}^T \beta^t \ln(C_t)$$

où $0 < \beta < 1$ et C_t est la consommation de l'agent à la date t . L'horizon de temps T est supposé très long et éventuellement infini. C_t est un indice de consommation à la Dixit-Stiglitz défini sur le continuum des biens finaux comme suit :

$$C_t^\alpha = \int_0^1 c_{it}^\alpha di \quad (6)$$

où $0 < \alpha < 1$.

Comme les préférences du consommateur sont séparables, la décision d'affectation intertemporelle du revenu entre épargne et consommation peut être analysée indépendamment du choix de la composition du panier de consommation à chaque période.

3.1.1 Affectation intertemporelle du revenu

Le consommateur affecte ses revenus de façon à résoudre le problème suivant (le prix du panier de consommation est normalisé à 1) :

$$\max_{\{C_t\}_{t=1, \dots, T}} \sum_{t=1}^T \beta^t \ln(C_t) \quad (7)$$

sous la contrainte que

$$\Omega_{t+1} = \Omega_t [1 + r_t] + \pi_t - C_t, \quad \Omega_1 \text{ donné} \quad (8)$$

où Ω_t mesure la richesse financière au début de la période $t \geq 1$ (Ω_1 étant donné). r_t est le taux d'intérêt réel et π_t est le profit total généré par l'ensemble des firmes. En outre, le sentier de consommation optimal doit aussi vérifier la contrainte de solvabilité suivante :

$$\Omega_{T+1} \geq 0.$$

La condition d'optimalité du premier ordre conduit à :

$$\frac{1}{C_t} = \beta [1 + r_{t+1}] \frac{1}{C_{t+1}}, \quad t \geq 1 \quad (9)$$

avec la condition finale $\Omega_{T+1} = 0$ ou $C_T = (1 + r_T)\Omega_T + \pi_T$.

3.1.2 Choix du panier de consommation

Etant donné un niveau donné de l'indice de consommation C_t , le consommateur choisi son panier de biens de consommation de façon à minimiser son coût :

$$\min_{c_{it}} \int_0^1 p_{it} c_{it} di$$

sous la contrainte (6) et où p_{it} est le prix du bien i ($i \in [0, 1]$) à la date t . Les conditions d'optimalité conduisent à :

$$c_{it} = \left[\frac{p_{it}}{\widehat{p}_t} \right]^{-\epsilon} C_t, \forall i \in [0, 1] \quad (10)$$

où $\epsilon = \frac{1}{1-\alpha}$. \widehat{p}_t est l'indice de prix de la consommation (c-à-d le prix du panier de consommation), défini implicitement par $\widehat{p}_t C_t = \int_0^1 p_{it} c_{it} di$, ce qui donne compte tenu de (10) :

$$\widehat{p}_t^{1-\epsilon} = \int_0^1 p_{it}^{1-\epsilon} di = 1 \quad (11)$$

La deuxième égalité découle du fait qu'on a normalisé l'indice de prix de la consommation à 1 (cfr le point 3.1.1).

3.2 Le comportement des entreprises

Comme pour le consommateur, on peut décomposer le comportement d'une firme en deux étapes : (i) à niveau de stock de capital donné, la détermination de la composition de ce stock en termes des différents biens d'investissement et (ii) les décisions en matière de niveaux de prix, de production et de stock de capital. On suppose que l'installation du capital productif prend une période. Par ailleurs, par soucis de simplicité⁷, on suppose que son taux de dépréciation est unitaire. Une fois installé, le capital d'une firme ne dure donc qu'une période.

3.2.1 La demande de biens d'investissement

La firme j construit son stock de capital en combinant des biens achetés aux différentes entreprises monopolistiques, et ce, selon la formule suivante :

$$k_{j,t+1}^\alpha = \int_0^1 \iota_{jit}^\alpha di \quad (12)$$

où $0 < \alpha < 1$. ι_{jit} est la quantité de bien d'investissement i acheté par la firme j à la date t afin de constituer son stock de capital à la période suivante, $k_{j,t+1}$ (qui est donc un indice de capital à la Dixit-Stiglitz).

⁷Pour éviter notamment les complications liées à l'agrégation d'un capital hétérogène en terme de masse, présentes notamment chez Akao et Managi (2007).

Afin de constituer son stock de capital, la firme j choisit les différentes quantités de biens d'investissement de façon à minimiser son coût d'investissement. Autrement dit, elle résout le problème suivant :

$$\min_{\{\iota_{jit}\}_i} \int_0^1 p_{it} \iota_{jit} di$$

sous la contrainte (12), $k_{j,t+1}$ étant donné, et où p_{it} est le prix du bien i à la date t .

Les demandes de bien d'investissement i ($i \in [0, 1]$) par la firme j s'écrivent :

$$\iota_{jit} = \left[\frac{p_{it}}{\bar{p}_t} \right]^{-\epsilon} k_{j,t+1}, \quad \forall i \in [0, 1] \quad (13)$$

où $\epsilon = \frac{1}{1-\alpha}$. \bar{p}_t est l'indice de prix du capital défini implicitement par $\bar{p}_t k_{j,t+1} = \int_0^1 p_{it} \iota_{jit} di$, ce qui donne compte tenu de (13) :

$$\bar{p}_t^{1-\epsilon} = \int_0^1 p_{it}^{1-\epsilon} di \quad (14)$$

Cet indice est commun à toutes les firmes parce que les biens monopolistiques apparaissent dans les indices à la Dixit-Stiglitz définis ci-dessus de façon symétrique (cfr. (6) et (12)) et parce que les firmes ont accès à la même technologie. De la comparaison de (11) et (14), il résulte que $\bar{p}_t = \hat{p}_t = 1$.

Etant donné (13), la demande totale de bien d'investissement i s'écrit :

$$d_{it} = \int_0^1 \iota_{jit} dj = \int_0^1 [p_{it}]^{-\epsilon} k_{j,t+1} dj = [p_{it}]^{-\epsilon} I_t \quad (15)$$

où $I_t =_{def} \int_0^1 k_{j,t+1} dj$.

3.2.2 Détermination de la production et du stock de capital

Etant donnés (10) and (15), la demande totale adressée à la firme j s'écrit :

$$y_{jt} = c_{jt} + d_{jt} = [p_{it}]^{-\epsilon} [C_t + I_t] \quad (16)$$

Héritant d'un stock de capital donné à la date 1 (k_{j1}), la firme choisit son prix, sa production et son stock de capital pour chacune des périodes suivantes de façon à maximiser la somme de ses profits actualisés, c-à-d en résolvant :

$$\max_{\{p_{jt}, y_{jt}, k_{j,t+1}\}_{t \geq 1}} \sum_{t=1}^T \frac{p_{jt} y_{jt} - \bar{p}_t k_{j,t+1}}{\prod_{\tau=1}^t [1 + r_\tau]} \quad (17)$$

sous les contraintes (16) et

$$y_{jt} \leq \left[\frac{a \mu_t}{1 - \frac{X_t}{R_{t-1}}} \right]^{-1} k_{jt}, \quad \forall t \geq 1 \quad (18)$$

Pour mémoire, le prix du capital \bar{p}_t est unitaire. La résolution de ce problème conduit à la condition suivante :

$$\frac{\alpha p_{jt}}{1+r_t} = \frac{1}{a\mu_t} \left[1 - \frac{X_t}{R_{t-1}} \right] = \frac{k_{jt}}{y_{jt}} \quad (19)$$

En outre, dans le cas d'un horizon T fini, la firme ne réalisera aucun investissement à la dernière période, ce qui implique que $k_{T+1} = 0$.

3.3 Le système cycle naturel - économie

Les entreprises faisant des choix identiques, il en ressort que l'équilibre est symétrique, et donc $\forall j \in [0, 1], \forall t > 1 : p_{jt} = p_t = \hat{p}_t = 1, y_{jt} = y_t, k_{jt} = k_t$ et $x_{jt} = x_t$. Des égalités précédentes et de (10) et (15), il découle alors que $\forall i \in [0, 1], \forall t > 1 : c_{it} = c_t = C_t$ et $d_{it} = d_t = I_t = k_{t+1}$. En outre, comme le continuum des firmes est l'intervalle $[0, 1]$, alors :

$$X_t = x_t \quad (20)$$

et la condition d'équilibre sur le marché des biens s'énonce :

$$y_t = c_t + k_{t+1} \quad (21)$$

Enfin, compte tenu (i) qu'une partie de la matière présente dans le système cycle naturel-économie s'accumule sous forme de capital productif, et (ii) que ce système étant fermé, la matière totale qui y est contenue est constante (vu la loi de conservation de la masse), il en découle que :

$$D_{t-1} + R_{t-1} + \mu_{t-1}k_t = M, \quad \forall t \geq 1 \quad (22)$$

Au début de chaque période t , la matière est donc soit sous forme de ressource "noble" R_{t-1} , soit sous forme de ressource dégradée D_{t-1} , soit incorporée dans le stock de capital k_t . Cette 3ème composante de la matière n'apparaissait pas dans le cadre du cycle naturel sans économie (cfr. (2)).

La dynamique de la ressource "noble" devient :

$$R_t - R_{t-1} = E_{t-1} - \delta_R R_{t-1} - x_t \quad (23)$$

A côté des mécanismes naturels à la base de la dégradation de la ressource "noble" au taux δ_R (déjà observés au niveau du cycle naturel; cfr. (1)), apparaît un deuxième facteur de dégradation de cette ressource, à savoir son exploitation par les entreprises.

La Figure 1 fait apparaître d'autres impacts de l'économie sur l'environnement. En premier lieu, une fois consommés sous la forme de biens de consommation ou sous forme de capital, les biens prennent la forme de déchets et contribuent au stock de ressource "dégradée" D .

Ensuite, l'économie interagit avec l'environnement en affectant sa *capacité à assurer le recyclage naturel* allant de D à R . Plus précisément, on postule que

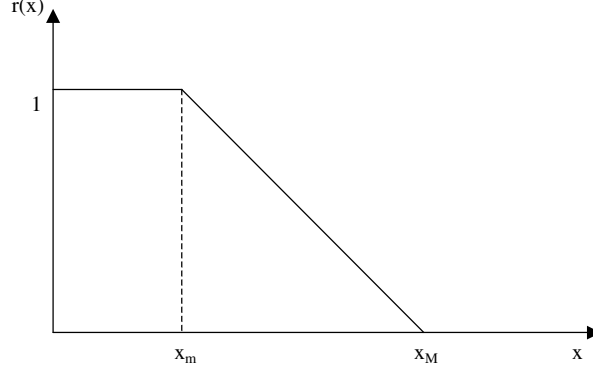


Figure 2: relation entre environnement et pollution

cette capacité (E) est affectée négativement par la pollution générée par le flux de matière mobilisé par l'activité humaine une fois que ce flux (mesuré par x) dépasse un certain seuil x_m . Comme toute matière extraite du stock de matière "noble" se retrouve après utilisation sous forme de déchet (pendant la période en cours ou à la période suivante), on suppose par soucis de simplicité que cette pollution se confond avec x .

La dynamique de E est supposée obéir à l'équation suivante :

$$E_t - E_{t-1} = \delta_E [r(x_t)E_M - E_{t-1}] \text{ si } E_{t-1} \geq E_m \quad (24)$$

$$= -\delta_E E_{t-1} \text{ si } E_{t-1} < E_m \quad (25)$$

où δ_E, E_m, E_M sont des constantes exogènes positives (avec $0 < \delta_E \leq 1$ et $0 < E_m < E_M$) et r est définie par :

$$r(x) = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{x_M - x}{x_M - x_m}, 1 \right\} \right\} \quad (26)$$

La fonction r est définie sur \mathbb{R}^+ et x_m, x_M sont deux constantes positives telles que $0 < x_m < x_M$ (cfr. Figure 2). x_m est la *capacité de charge* de l'environnement⁸, c-à-d le niveau de pollution maximal que celui-ci peut subir sans dégradation. Si x_t demeure à un niveau constant \hat{x} au dessus de x_m , alors E tend vers une valeur d'équilibre de long terme égale à $r(\hat{x})E_M < E_M$. Cette valeur d'équilibre est positive si $\hat{x} < x_M$ et nulle si $\hat{x} \geq x_M$. On ne peut cependant pas qualifier x_M de seuil catastrophique dans la mesure où rien ne dit que une fois au delà de x_M , la pollution va y rester.

⁸A ne pas confondre avec la capacité de l'environnement à assurer le recyclage naturel.

Le phénomène de dégradation décrit par (24) est réversible tant que $E_t \geq E_m$. Malgré sa dégradation, la faculté de régénérescence de l'environnement est préservée. En revanche, si au cours de la trajectoire du système E décroît sous E_m , alors cette faculté est irrémédiablement atteinte et en vertu de (25), E tend irrémédiablement vers 0. On peut donc qualifier E_m de *seuil catastrophique*⁹.

4 Dynamique et états stationnaires

Compte tenu des équations (3), (5), (9), (19) à (26) et du fait que l'équilibre est symétrique, les équations caractérisant le système cycle naturel-économie à chaque période $t \geq 1$ se ramènent finalement à ce qui suit :

$$\frac{1}{c_t} = \beta [1 + r_{t+1}] \frac{1}{c_{t+1}} \quad (27)$$

$$y_t = c_t + k_{t+1} \quad (28)$$

$$\frac{k_t}{y_t} = a \frac{\mu_t}{1 - \frac{x_t}{R_{t-1}}} \quad (29)$$

$$x_t = \mu_t y_t \quad (30)$$

$$M = D_{t-1} + R_{t-1} + \mu_{t-1} k_t \quad (31)$$

$$\frac{k_t}{y_t} = \frac{\alpha}{1 + r_t} \quad (32)$$

$$R_t - R_{t-1} = E_t - \delta_R R_{t-1} - x_t \quad (33)$$

$$E_t - E_{t-1} = \delta_E [r(x_t) E_M - E_{t-1}] \text{ si } E_{t-1} \geq E_m \quad (34)$$

$$= -\delta_E E_{t-1} \text{ si } E_{t-1} < E_m \quad (35)$$

À chaque période t , le système est décrit par 8 équations à 8 inconnues : $c_t, y_t, R_t, D_t, x_t, r_t, k_{t+1}, E_t$. Les conditions initiales sont k_1, D_0, R_0, E_0 . La condition terminale est $k_{T+1} = 0$ ou $c_T = y_T$.

4.1 Réduction de la dimension du système

Les équations (27), (28) et (32) impliquent :

$$\frac{c_{t+1}}{c_t} = \alpha \beta \frac{y_{t+1}}{k_{t+1}} \Rightarrow \frac{k_{t+1}}{c_t} = \alpha \beta \frac{y_{t+1}}{c_{t+1}} \Rightarrow \frac{y_t - c_t}{c_t} = \alpha \beta \frac{y_{t+1}}{c_{t+1}}$$

Soit $s =_{def} \alpha \beta$ et z_t l'inverse du taux de consommation, c-à-d $z_t = y_t/c_t$. L'équation précédente conduit à l'équation aux différences linéaire et autonome

⁹On retrouve cette hypothèse dans certains modèles de ressources renouvelables. Dans l'exemple d'une population de poissons, le seuil catastrophique désigne le niveau en dessous duquel la population n'est plus assez nombreuse pour que le taux de natalité puisse compenser le taux de mortalité. Taylor (2009) postule également cette hypothèse.

du premier ordre :

$$sz_t = z_{t-1} - 1$$

dont la solution générale s'écrit :

$$z_t = \frac{1 - s^{T+1-t}}{1 - s}$$

Si l'horizon de temps des agents est infini ($T \rightarrow \infty$), alors z_t est constant et égal à $1/[1 - s]$. Dans ce cas, $c_t = [1 - s]y_t$; la propension à épargner est constante et égale à $s = \alpha\beta$.

Par souci de simplicité, on supposera que c'est le cas par la suite. (28), (29) et (30) conduisent alors à :

$$sy_{t-1} = k_t \Rightarrow s \frac{y_{t-1}}{y_t} = \frac{k_t}{y_t} = a \frac{\mu_t}{1 - \frac{x_t}{R_t}} \Rightarrow sy_{t-1} \left[1 - \frac{\mu_t y_t}{R_{t-1}} \right] = a \mu_t y_t$$

La dernière égalité, ainsi que (33) et (34)-(35), permettent de réduire le système cycle naturel-économie aux équations suivantes :

$$y_t = \frac{1}{\mu_t \left[\frac{a}{sy_{t-1}} + \frac{1}{R_{t-1}} \right]} \quad (36)$$

$$R_t = E_t + [1 - \delta_R] R_{t-1} - \frac{1}{\frac{a}{sy_{t-1}} + \frac{1}{R_{t-1}}} \quad (37)$$

$$E_t - E_{t-1} = \delta_E [r(\mu_t y_t) E_M - E_{t-1}] \text{ si } E_{t-1} \geq E_m \quad (38)$$

$$= -\delta_E E_{t-1} \text{ si } E_{t-1} < E_m \quad (39)$$

avec les conditions initiales R_0, E_0, y_0 . Une fois ces équations résolues, toutes les autres variables ($c_t, D_t, x_t, r_t, k_{t+1}$) peuvent être calculées via le système (27)-(35).

4.2 Les équilibres stationnaires

4.2.1 Cycle naturel sans économie

Le cycle naturel sans économie est caractérisé par les équations (1) et (2). L'état stationnaire s'écrit :

$$R_0 = E_M / \delta_R \quad (40)$$

$$D_0 = M - E_M / \delta_R \quad (41)$$

4.2.2 Cycle naturel avec économie

L'état stationnaire correspond à des valeurs de y , E et R constantes, ce qui suppose $\mu_t = \underline{\mu}$. (36) implique alors :

$$\underline{\mu}y = x = \left[1 - \frac{a\underline{\mu}}{s}\right] R \quad (42)$$

Afin que cette égalité ait un sens, il importe que

$$\xi =_{def} 1 - \frac{a\underline{\mu}}{s} \quad (43)$$

soit positif (sinon y ou R serait négatif). Par ailleurs, (37) implique que $\delta_R R = E - x$, ce qui combiné avec (42) conduit à :

$$x = \frac{\xi E}{\xi + \delta_R} \quad (44)$$

Pour caractériser les états stationnaires, il importe de distinguer les différents régimes correspondant aux équations (38)-(39) :

1. Régime I ($x \leq x_m$ et $E \geq E_m$) : $r(x) = 1$. Alors, en vertu de (42) et (44), l'équilibre stationnaire du régime I est défini par :

$$E_I = E_M \quad (45)$$

$$R_I = \frac{E_M}{\delta_R + \xi} \quad (46)$$

$$y_I = \frac{x_I}{\underline{\mu}} = \frac{1}{\underline{\mu}} \frac{\xi E_M}{\delta_R + \xi} \quad (47)$$

Le régime I admet donc un équilibre unique. La Figure 3 l'illustre graphiquement dans le plan (x, E) . Il se trouve à l'intersection de la droite $E = [\delta_R/\xi + 1]x$ (obtenue par simple inversion de (44)) et de l'horizontale $E = E_M$.

Pour exister, encore faut-il qu'il vérifie les conditions caractérisant le régime I ($x \leq x_m$ et $E \geq E_m$). La deuxième est satisfaite car $E_M > E_m$ par hypothèse. Etant donné (47), la première condition entraîne que :

$$\frac{E_M}{x_m} < \frac{\delta_R + \xi}{\xi} \quad (48)$$

Puisque $\xi > 0$, il apparaît de la comparaison de (40) et de (46) que $R_I < R_0$. L'activité humaine se traduit à l'équilibre par moins de ressource "noble" par rapport à la situation sans économie. Cela est intuitif puisque cette activité est consommatrice de cette ressource. En revanche, la capacité de l'environnement à assurer le cycle naturel n'est pas affectée.

2. Régime II ($x_m \leq x \leq x_M$ et $E \geq E_m$) : $r(x) = \frac{x_M - x}{x_M - x_m}$ et $E = \frac{x_M - x}{x_M - x_m} E_M$. Alors, en vertu de (42) et (44), l'équilibre stationnaire du régime II est défini

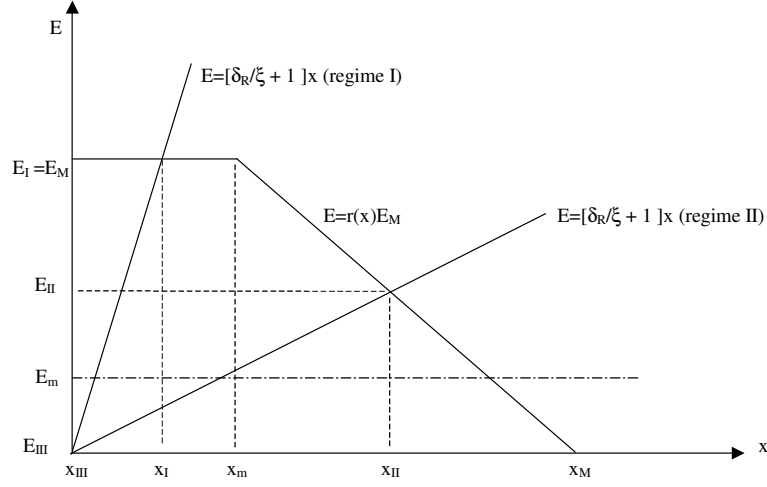


Figure 3: équilibres des différents régimes

par :

$$E_{II} = \frac{x_M E_M}{\frac{\xi E_M}{\delta_R + \xi} + \Delta x} \quad (49)$$

$$R_{II} = \frac{x_M E_M}{\xi E_M + [\delta_R + \xi] \Delta x} \quad (50)$$

$$y_{II} = \frac{x_{II}}{\underline{\mu}} = \frac{1}{\underline{\mu}} \frac{x_M E_M}{E_M + \frac{\delta_R + \xi}{\xi} \Delta x} \quad (51)$$

où $\Delta x =_{def} x_M - x_m$. Le régime II admet donc un équilibre unique. La Figure 3 l'illustre graphiquement dans le plan (x, E) . Il se trouve à l'intersection des droites $E = [\delta_R/\xi + 1]x$ (obtenue par simple inversion de (44)) et $E = r(x)E_M$.

Pour exister, encore faut-il qu'il vérifie les conditions caractérisant le régime II ($x_m \leq x \leq x_M$ et $E \geq E_m$). La première conduit à inverser la condition (48) ainsi qu'à $\frac{x_M E_M}{E_M + \frac{\delta_R + \xi}{\xi} \Delta x} < x_M$, ce qui sera toujours nécessairement satisfait puisque tous les paramètres présents sont positifs. La deuxième condition implique quant à elle que :

$$E_m \leq \frac{x_M E_M}{\frac{\xi E_M}{\delta_R + \xi} + \Delta x} \quad (52)$$

Graphiquement, il faut que l'intersection des droites $E = [\delta_R/\xi + 1]x$ et $E = r(x)E_M$ se situe au dessus de $E = E_m$ (cfr. Figure 3).

L'activité humaine se traduit à l'équilibre du régime II par moins de ressource "noble" par rapport à la situation sans économie. En outre, la capacité de l'environnement à assurer le cycle naturel est affectée (contrairement à ce qui se passait dans le régime I). Le niveau d'activité de long terme est trop élevé pour être compatible avec la préservation de l'environnement. Formellement, ξ est trop élevé, ce qui se traduit par une pente de la droite $E = [\delta_R/\xi + 1]x$ trop faible. Comme le montre (43), ξ est d'autant plus élevé que les coûts d'extraction de la ressource "noble" sont faibles (a faible), le niveau de dématérialisation est élevé (μ faible), le taux d'épargne est élevé (s élevé).

A noter que si le système cycle naturel-économie admet un équilibre dans le régime I, il n'en admet pas dans le régime II et vice versa.

3. Régime III ($E < E_m$) : En vertu de (39), l'équilibre est caractérisé par $E = 0$. De (44) et (42), il découle alors que l'équilibre stationnaire du régime III est défini par :

$$E_{III} = R_{III} = y_{III} = x_{III} = 0 \quad (53)$$

Cet équilibre coexiste soit avec l'équilibre du régime I, soit avec celui du régime II, si un de ces deux équilibres existe. Mais il peut aussi être le seul équilibre possible. Ce sera le cas si l'intersection des droites $E = [\delta_R/\xi + 1]x$ et $E = r(x)E_M$ se situe en dessous de $E = E_m$ (cfr. Figure 3), autrement dit si la condition (52) est inversée.

L'équilibre du régime III correspond à la "mort" du système cycle naturel-économie. Le niveau d'activité de long terme est tellement élevé qu'il est incompatible avec le maintien de la faculté de régénérescence de l'environnement.

5 Résultats des simulations

Les simulations ont pour but d'illustrer numériquement les différents comportements possibles du modèle. On suppose que le système est initialement à un équilibre stationnaire sans économie. Graphiquement (cfr. Figure 3), il se trouve au point $(0, E_M)$. La capacité de l'environnement à assurer le recyclage naturel est à son maximum¹⁰.

¹⁰Le choix des valeurs des paramètres s'est fait sur base d'informations dans la littérature, ou le plus souvent par tâtonnement de façon à ne devoir faire varier qu'un nombre minimal de paramètres pour engendrer tous les comportements possibles. Les valeurs de référence choisies sont les suivantes :

- valeur limite de la masse par unité produite : $\mu = .1$
- taux de dépréciation naturelle de la RN : $\delta_R = .1$
- taux de dégradation ou de réparation de l'environnement : $\delta_E = .025$
- paramètre de la fonction de coût d'extraction : $a = 2$
- masse totale dans le système : $M = 200$
- valeur initiale de la ressource "noble" : $R_0 = M/2$
- les valeurs de E_M et y_0 sont calibrées de façon à correspondre au cycle naturel sans économie: $E_M = \delta_R R_0$ et y_0 très faible ($= 1$)
- seuil catastrophique : $E_m = E_M/2.5$
- capacité de charge : $x_m = 5$

Afin d'illustrer les différentes trajectoires possibles, on a fait varier les paramètres s et δ_E . Plus s est élevé, plus l'économie est susceptible de croître rapidement. Plus δ_E est élevé, plus l'environnement est sensible à l'activité humaine (mesurée par x), que ce soit en terme de dégradation ou de réparation. On commence en supposant qu'il n'y a pas de progrès technique dématérialisant la production. Cette hypothèse sera levée plus bas.

Le modèle étant très schématique, les valeurs numériques n'ont guère d'intérêt pour elles-mêmes et l'analyse sera surtout mise sur l'allure générale des trajectoires. Le Tableau 1 rassemble les principaux résultats. Pour les simulations 1 à 12, c'est le paramètre s qui varie. Les colonnes 3 à 8 fournissent successivement la valeur asymptotique de la production matérielle x (qui se confond avec celle de la pollution), le régime auquel appartient l'équilibre, la valeur maximale de x , la valeur asymptotique de l'environnement E , et la valeur minimale de celui-ci. Le rapport x_{\max}/x_m mesure le dépassement de la capacité de charge de l'environnement.

- **simulation 1** ($s = .21$ et $\delta_E = .025$) : la trajectoire de la production est (quasi) monotone croissante et se stabilise à un niveau sous x_m (cfr Figure 4). La croissance de l'économie a l'allure d'une sigmoïde. Le ralentissement de la croissance est due au mécanisme correcteur suivant : en vertu du principe de conservation de la masse, la hausse de D et de k suite au développement de l'économie se traduit par une raréfaction de R , ce qui implique des coûts d'extraction (sous forme de capital) croissants. La croissance des profits liée à l'accumulation du capital tend à se ralentir, ce qui permet au système de se stabiliser à l'équilibre. En outre, dans cette simulation, l'accumulation du capital est suffisamment douce pour permettre une convergence (quasi) monotone vers l'équilibre. Celui-ci appartient au régime I. L'environnement n'est jamais dégradé (cfr Figure 5).

La croissance monotone ne se vérifie plus pour la **simulation 2** ($s = .215$). Lors de la phase de croissance de l'économie, x dépasse après un certain temps de façon visible sa valeur asymptotique, pour ensuite y converger. x reste cependant toujours en dessous de x_m , et l'environnement n'est donc jamais dégradé.

Tableau 1 : Résultats des simulations

simulation ($\delta_E = .025$)	s	x	régime	x_{\max}	E	E_{\min}
1	0.21	3.23	I	3.23	10	10
2	0.215	4.11	I	4.22	10	10
3	0.22	4.76	I	5.09	10	9.99
4	0.225	5.19	II	5.91	9.87	9.82
5	0.23	5.48	II	6.67	9.68	9.67
6	0.235	5.70	II	7.41	9.53	9.53
7	0.24	5.88	II	8.11	9.41	9.41
8	0.245	6.03	II	8.79	9.31	9.31
9	0.25	6.15	II	9.42	9.23	9.23
10	0.3	6.78	II	14.89	8.81	8.81
11	0.35	7.02	II	19.23	8.65	8.65
12	0.4	7.14	II	22.69	8.57	8.57
simulation ($s = .35$)	δ_E	x	régime	x_{\max}	E	E_{\min}
13	.05	7.02	II	19.15	8.65	8.08
14	.1	7.02	II	18.98	8.65	6.77
15	.15	7.02	II	18.82	8.65	5.77
16	.2	7.02	II	18.67	8.65	4.94
17	.25	7.02	II	18.54	8.65	4.34
18	0.3	0	III	18.52	0	0
progrès technique ($s = .25, \delta_E = .025$)	$\underline{\mu}$	x	régime	x_{\max}	E	E_{\min}
19	.09	6.59	II	12.19	8.94	8.94
20	.08	6.86	II	14.77	8.76	8.76
21	.07	7.04	II	17.20	8.64	8.64
22	.06	7.17	II	19.42	8.55	8.55
23	.05	7.27	II	21.31	8.48	8.48
($s = .30, \delta_E = .025$)						
24	.1	6.77	II	14.67	8.81	5.60
25	.07	0	III	19.99	0	0

- **simulation 3** ($s = .22$ et $\delta_E = .025$) : la trajectoire est similaire à celle de la simulation 2, mais cette fois, x dépasse après un certain temps x_m (cfr. Figure 6). Il y a donc dépassement de la limite à partir de laquelle E est dégradé. Le recyclage naturel assuré par l'environnement est donc affecté, ce qui ralentit le renouvellement de la ressource "noble". Cette force de rappel vient se conjuguer à celle déjà présente dans la simulation 1 (à savoir la hausse des coûts d'extraction induit par la raréfaction de la ressource "noble"), ce qui se traduit par un retournement de tendance. La réduction de la production et donc de la pollution permet à l'environnement de se régénérer, lui permettant de retrouver son niveau initial (cfr Figure 7). Le système tend par la suite vers son équilibre de long terme.

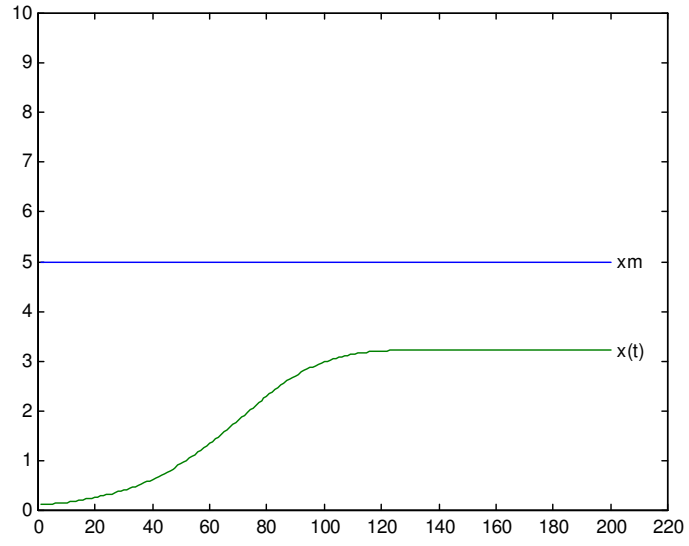


Figure 4: simulation 1 (x_t)

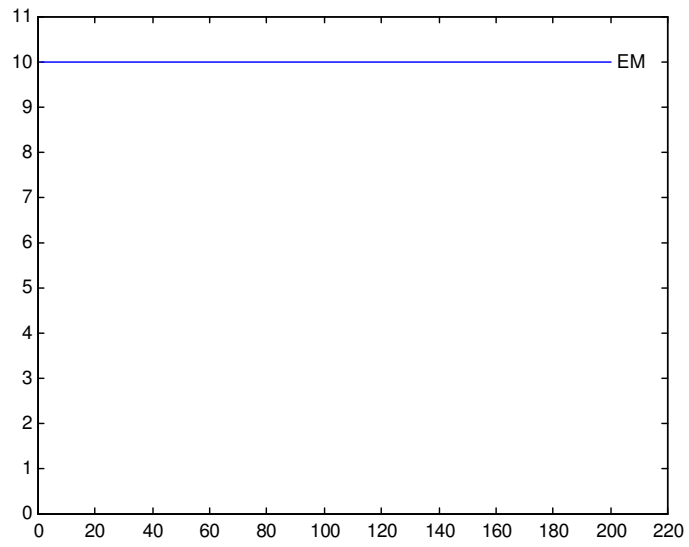


Figure 5: simulation 1 (E_t)

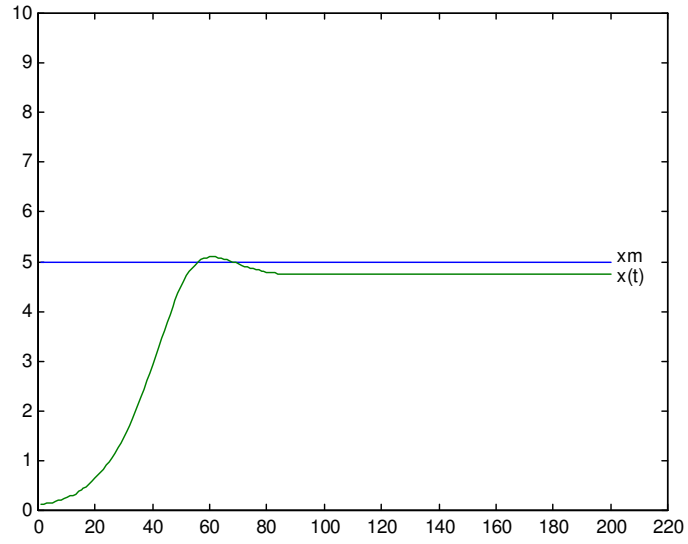


Figure 6: simulation 3 (x_t)

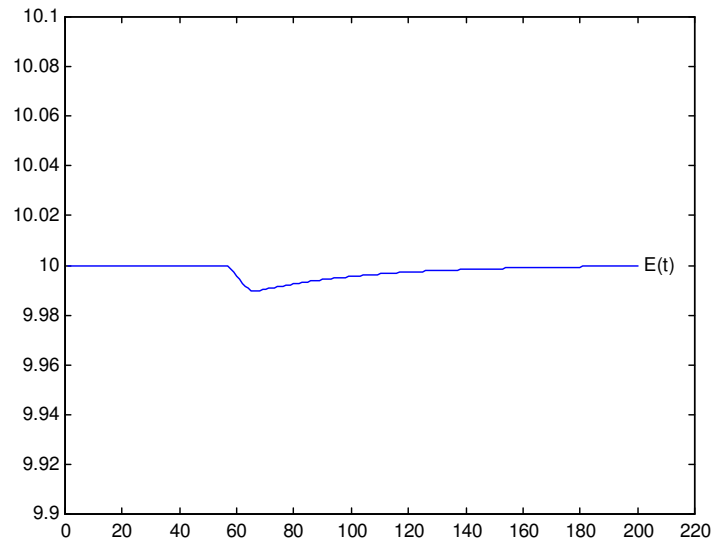


Figure 7: simulation 3 (E_t)

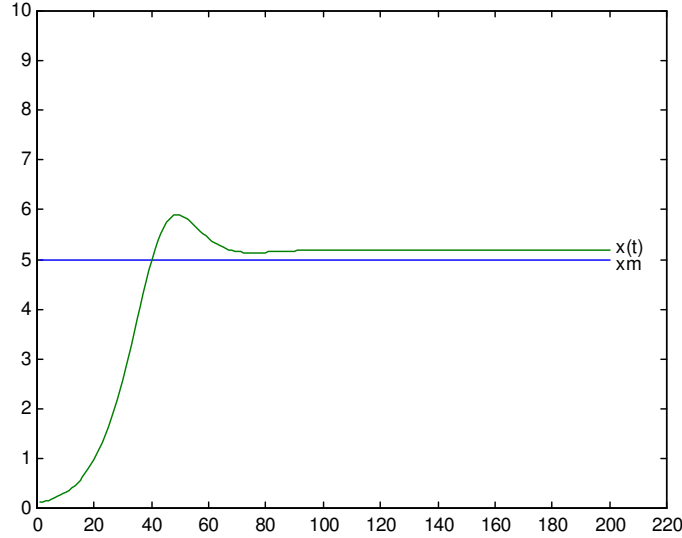


Figure 8: simulation 4 (x_t)

- **simulation 4** ($s = .225$ et $\delta_E = .025$) : la trajectoire est similaire à celle de la simulation 3, mais suite au dépassement de x_m , la trajectoire demeure au dessus de cette valeur (cfr Figure 8). Contrairement aux simulations précédentes, le système converge au sein du régime II. La décroissance économique n'est pas suffisante pour conduire à un niveau d'activité compatible avec la restauration complète de l'environnement (cfr. Figure 9). Comme le montre la comparaison entre les valeurs minimale et d'équilibre de E (cfr. Tableau 1), cette décroissance est cependant suffisante pour permettre une régénérescence partielle de celui-ci.

La **simulation 5** ($s = .23$) conduit à des résultats similaires, à la nuance près que la restauration de l'environnement est très limitée.

- **simulation 6** ($s = .235$ et $\delta_E = .025$) : comme dans le cadre des simulations 3 à 5, il y a dépassement de x_m , suivi d'un ralentissement de l'activité économique (cfr Figure 10). Le fait nouveau est que ce ralentissement ne permet aucune régénérescence durable de l'environnement¹¹. La valeur d'équilibre de l'environnement est aussi sa valeur minimale (cfr. Figure 11). Cette tendance (quasi) monotone à la baisse de E est liée à la faible valeur de δ_E , qui implique une forte inertie dans le comportement de E . A x donné, E évolue lentement vers sa valeur d'équilibre ($r(x)E_M$), que ce soit à la baisse ou à la hausse. E

¹¹On observe une courte période de rémission, où l'environnement se restaure très légèrement, mais cette rémission se révèle non durable. L'environnement repart définitivement à la baisse par après.

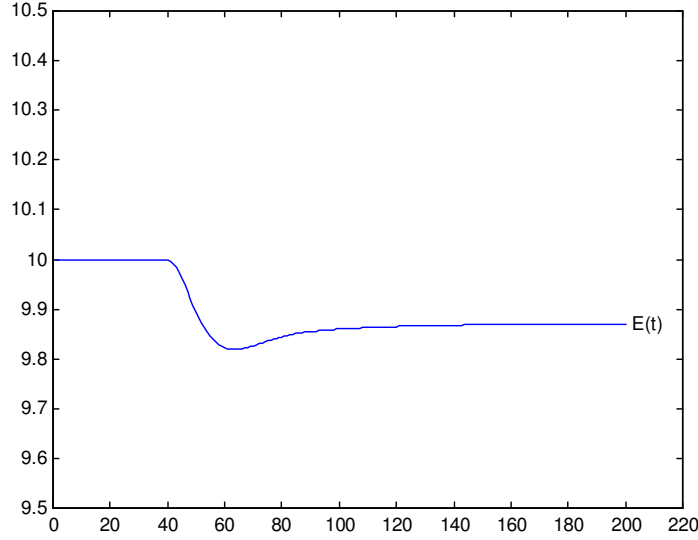


Figure 9: simulation 4 (E_t)

se dégrade ou se restaure donc lentement. Les simulations 13 à 17 montreront à contrario qu'avec des valeurs plus élevées de δ_E réapparaît systématiquement une phase de régénérescence.

Les **simulations 7 à 12** conduisent à des résultats similaires à ceux de la simulation 6. Le tableau ci-dessus montre que plus le taux d'épargne est élevé, (i) plus le niveau de production (et de pollution) est élevé, (ii) plus l'environnement est dégradé et (iii) plus le dépassement (mesuré par le rapport x_{\max}/x_m) est important. Par ailleurs, les simulations 10 à 12, qui se caractérisent par un taux d'épargne très élevé ($s \geq 30\%$), ne montrent rien de qualitativement neuf. En particulier, le niveau de E reste largement supérieur au seuil critique E_m , et ne s'en approche jamais. Un très haut taux d'épargne se traduit par un environnement assez dégradé, mais ne remet pas en question la viabilité du système cycle naturel-économie.

A partir des simulations suivantes, on fixe la valeur de s à .35. Le paramètre qui varie est dorénavant δ_E .

- **simulation 13 à 17** ($s = .35, \delta_E = .05$ à $.25$) : comparé à la simulation 11 (où δ_E est fixé à sa valeur de référence .025), on observe que (i) la hausse de δ_E ne modifie pas l'état final du système (celui-ci en effet ne dépend pas de δ_E), (ii) plus δ_E est élevé, plus la dégradation de l'environnement est profonde (plus E_{\min} décroît). Cette dégradation est cependant suivie d'une phase de

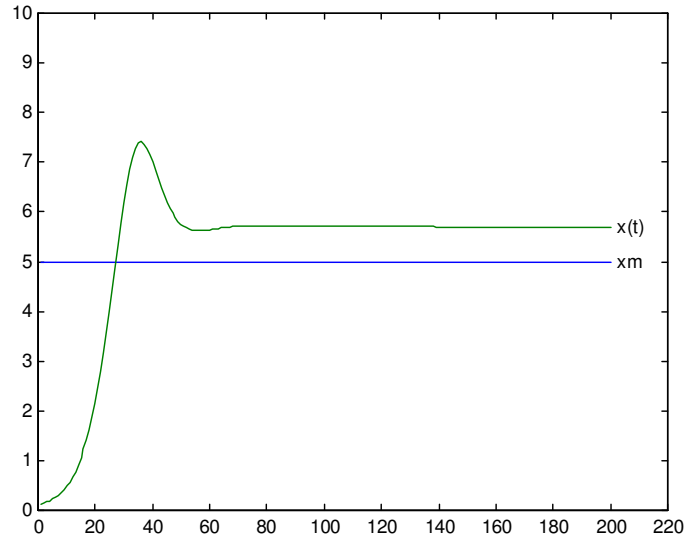


Figure 10: simulation 6 (x_t)

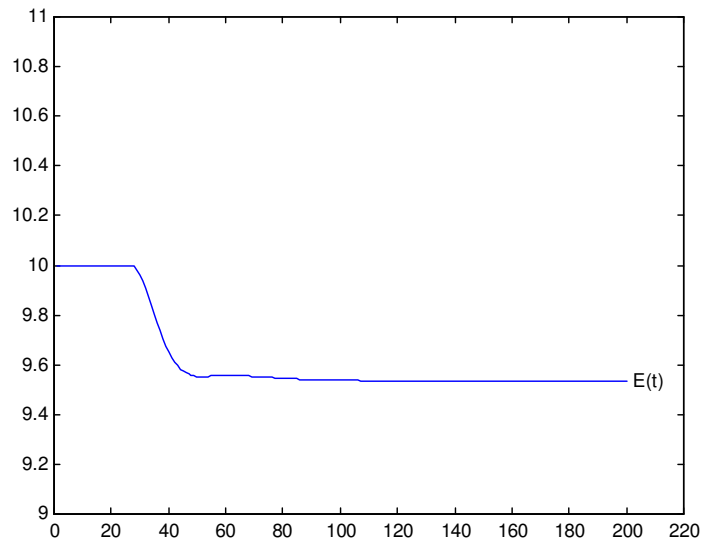


Figure 11: simulation 6 (E_t)

régénérescence conduisant à l'équilibre. Comme la valeur asymptotique de E est toujours la même, la restauration de l'environnement qui suit sa dégradation est également d'autant plus grande que δ_E est élevé. Comparé à la simulation 11, l'environnement se dégrade plus vite dès lors que la pollution dépasse le seuil x_m . Le recyclage naturel et par suite, le renouvellement de la ressource "noble", en sont d'autant plus affectés, ce qui exacerbe la hausse des coûts d'extraction déjà induite par la croissance de l'économie. Comme dans les simulations précédentes, il s'en suit une force de rappel qui ralentit l'activité, diminue la pollution et permet à l'environnement de se régénérer. Cette force n'est pas suffisante pour empêcher la dégradation de l'environnement, dégradation d'autant plus profonde que δ_E est élevé. Elle permet cependant au système de converger finalement vers le même équilibre de long terme.

- **simulation 18** ($s = .35, \delta_E = .3$) : la valeur de δ_E est cette fois suffisamment élevée pour que le processus de dégradation de l'environnement conduise après un certain temps le système en deça du seuil catastrophique E_m (cfr Figure 13). A partir de ce moment, la faculté de l'environnement à pouvoir se régénérer est irrémédiablement détruite. Le processus de dégradation devient alors irréversible, ce qui amène le système à l'équilibre $(x, E) = (0, 0)$, c-à-d à la mort du système cycle naturel-économie (régime III). Le taux de croissance de l'économie tend vers une valeur constante négative, d'où un effondrement de la production, ce qui traduit bien le fait que l'économie ne peut se maintenir sans environnement (cfr Figure 12).

Cette simulation appelle deux remarques. Tout d'abord, il importe de souligner que la mort du système résulte uniquement de la phase transitoire de la trajectoire. Ainsi, la condition (52) qui garantit l'existence de l'équilibre du régime II est largement satisfaite. Ensuite, on observe que pour obtenir cette issue, il faut *à la fois* un taux d'épargne très élevé et une grande sensibilité de l'environnement à la pollution.

Le dernier groupe de simulations concerne l'impact d'un progrès technique permettant une dématérialisation de la production. Les valeurs de s et de δ_E sont fixées respectivement à .25 et à .025. Le paramètre qui varie est dorénavant $\underline{\mu}$, c-à-d la valeur limite du contenu en matière d'une unité du bien. La valeur initiale de ce contenu est $\mu_0 = .1$. Le rapport $\mu_0/\underline{\mu}$ est donc un indicateur du potentiel de progrès technique en début de simulation. L'évolution de la dématérialisation est supposée se faire à taux constant, selon la formule :

$$\mu_t = \underline{\mu} + [\mu_0 - \underline{\mu}] q^t$$

où q est un paramètre fonction inverse du taux de progrès technique et fixé ici à .99.

- **simulation 19 à 23** ($s = .25, \delta_E = .025, \underline{\mu} = .09$ à $.05$) : ces simulations se caractérisent par un potentiel de progrès technique de plus en plus élevé. Comparé à la simulation 9 (où $\underline{\mu}$ est fixé à sa valeur de référence .1 et où le progrès technique est donc absent), on observe que le progrès en terme de dématérialisation se traduit par un niveau d'activité plus élevé et un environnement plus dégradé. A production donnée, le progrès technique permet de

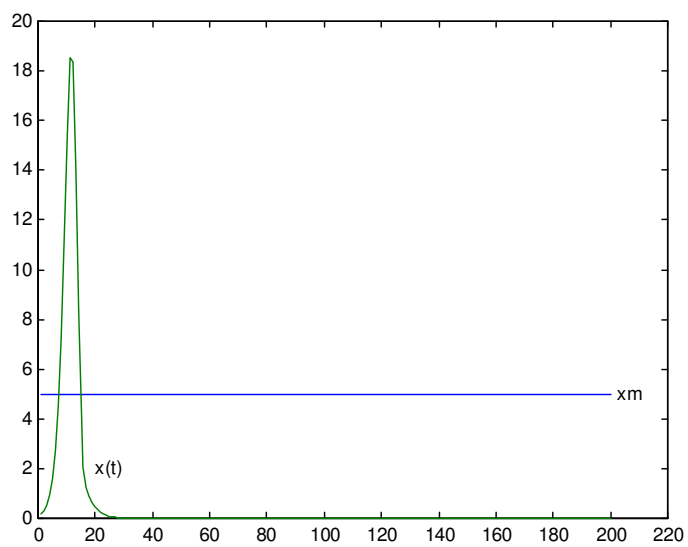


Figure 12: simulation 18 (x_t)

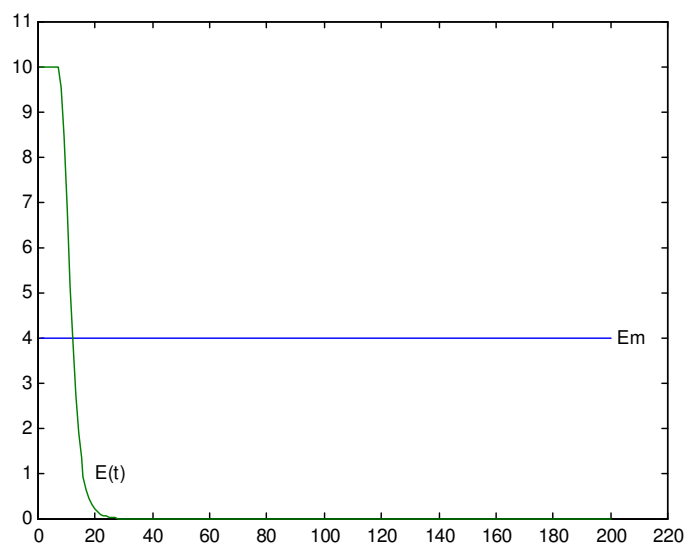


Figure 13: simulation 18 (E_t)

réduire le contenu en matière de la production, et donc la pollution, ce qui est favorable à l'environnement. Mais ce progrès réduit aussi les coûts d'extraction, ce qui augmente les profits et stimule l'accumulation du capital et la croissance, ce qui est négatif pour l'environnement. Les simulations montrent que ce deuxième effet (que l'on peut qualifier d'*effet "rebond"*) l'emporte sur le premier, et que la dégradation de l'environnement est d'autant plus forte que le potentiel de progrès est élevé. Dans un article rédent, Benckroun et Chaudhuri (2011) analyse un tel effet dans le contexte du transfert de technologies "propres" de pays développés vers des pays en développement motivé par la lutte contre le changement climatique.

Cet effet "rebond" fait soupçonner que "trop" de progrès technique peut avoir une influence catastrophique, en particulier si s et δ_E sont élevés. Ceci est confirmé par les deux simulations suivantes.

- **simulation 24 et 25** ($s = .30, \delta_E = .025, \underline{\mu} = .1$ et $.07$) : en l'absence de progrès technique (simulation 24), le système converge vers un équilibre appartenant au régime II. Il y a dégradation continue de l'environnement mais partant de $E_M = 10$, celui-ci se stabilise à une valeur ($E = 5.60$) relativement éloignée du seuil critique ($E_m = 4$). Avec les mêmes valeurs pour s et δ_E , la simulation 25 montre qu'un potentiel de progrès technique modeste ($\mu_0/\underline{\mu} = 1.43$ soit un potentiel de dématérialisation de 43% *sur l'ensemble de la trajectoire*) est suffisant pour déstabiliser le système et pour le conduire vers une issue catastrophique.

Remarque : l'intérêt de la simulation 25, et plus généralement celui des simulations avec progrès technique, est limité par le fait que celui-ci est exogène et à taux constant. Il n'y a pas de rétroactivité de l'activité économique sur son intensité. Or on peut imaginer que si le système s'effondre, le taux de progrès technique pourrait baisser, avec en conséquence une baisse de l'activité suffisante pour sauver le système (contrairement à ce qui passe dans la simulation 25).

6 Conclusion

Nous rappelons d'abord les principaux résultats du modèle. L'état initial du système est supposé être l'équilibre stationnaire du cycle naturel en l'absence d'économie. Partant de cet état, on suppose l'apparition et la croissance d'une économie qui vient s'insérer au sein du cycle naturel. Le développement de l'économie finit par rapprocher celle-ci de la capacité de charge de l'environnement, qu'elle peut éventuellement dépasser. Au moyen de simulations numériques du modèle, on analyse les impacts possibles de cette croissance économique et de ces dépassements éventuels sur le comportement dynamique du système global formé par le cycle naturel et l'économie. Les différentes simulations sont obtenues en faisant varier deux paramètres : la propension à épargner et la sensibilité de l'environnement à la pollution. Plus le premier paramètre est élevé, plus forte est la croissance de l'économie et en conséquence, plus le dépassement éventuel de la capacité de charge de l'environnement est important. Plus le second paramètre est élevé, plus fort est l'impact de ce dépassement sur la capacité

de l'environnement à assurer la rotation du cycle naturel.

Les simulations numériques permettent de construire une échelle d'impacts de la croissance économique sur l'environnement à plusieurs niveaux. Partant de l'équilibre stationnaire du cycle naturel en l'absence d'économie, le développement de celle-ci peut conduire le système à :

- (1) un nouvel équilibre de long terme qualitativement similaire à celui d'origine, au sens où la capacité de recyclage de l'environnement demeure à son niveau initial. La pollution reste constamment en dessous de la capacité de charge de l'environnement, et donc celui-ci n'est *jamaïs* dégradé.
- (2) un nouvel équilibre de long terme qualitativement similaire à celui d'origine, au sens où la capacité de recyclage de l'environnement demeure à son niveau initial. Cependant, la croissance économique s'accompagne d'une dégradation *transitoire* de l'environnement. Par après, la convergence vers l'équilibre s'accompagne d'une restauration *complète* de la capacité de l'environnement à assurer le recyclage naturel.
- (3) un nouvel équilibre de long terme qualitativement dégradé sur le plan environnemental par rapport à celui d'origine. La croissance économique s'accompagne d'une dégradation de l'environnement. Par après, la convergence vers l'équilibre s'accompagne d'une restauration *partielle* de la capacité de l'environnement à assurer le recyclage naturel. Le niveau d'activité demeure trop élevé à long terme pour permettre une régénérescence complète de l'environnement.
- (4) un nouvel équilibre de long terme qualitativement dégradé sur le plan environnemental par rapport à celui d'origine. La croissance économique s'accompagne d'une dégradation de l'environnement. Mais par après, la convergence vers l'équilibre ne s'accompagne d'*aucune* restauration de la capacité de l'environnement à assurer le recyclage naturel. Si la propension à épargner est suffisamment élevée, le dépassement de la capacité de charge de l'environnement est susceptible de conduire à un *effondrement transitoire* du capital et de la production, transitoire au sens où cet effondrement s'arrête avant le seuil à partir duquel l'environnement se dégrade irréversiblement.
- (5) la "mort" du système cycle naturel-économie, c-à-d à son effondrement *total* et *définitif*. La propension à épargner *et* la sensibilité de l'environnement à la pollution sont suffisamment élevés pour conduire l'environnement en dessous du seuil catastrophique, à partir duquel sa faculté de régénérescence est irrémédiablement neutralisée.

Les résultats obtenus appellent plusieurs remarques. Primo, ils présentent de nombreuses similitudes avec ceux obtenus par Taylor (2009), dans le cadre d'un modèle malthusien avec une ressource naturelle renouvelable. On obtient également des résultats qualitativement proches de ceux obtenus par Meadows et al. (2004) au moyen d'un modèle "réaliste" bien plus élaboré (plusieurs centaines d'équations souvent non-linéaires).

La deuxième remarque concerne la propension à épargner, qui dans le cadre présent, est directement proportionnelle à la préférence pour le futur. Les simulations aboutissent alors à une conclusion a priori paradoxale : *ceteris paribus*, plus les agents se soucient du futur, plus leurs choix sont susceptibles de nuire à l'environnement, une issue catastrophique devenant même inéluctable s'ils

n'escomptent pas assez le futur¹². Or, l'intuition suggère l'inverse : c'est parce que les agents ne se préoccupent pas assez du futur que leurs comportements menacent les équilibres environnementaux à long terme. Ce paradoxe s'explique par le fait que, dans le cadre du présent modèle, les agents ne se soucient pas de l'avenir du cycle naturel mais seulement de la meilleure façon d'étaler leur consommation dans le temps. Leur souci du futur est donc très particulier. Or, plus ils se préoccupent de leur propre futur, plus ils épargnent, ce qui stimule d'autant l'accumulation du capital, avec les effets pervers observés.

Les résultats ci-dessus ont été obtenus sans progrès technique. A production donnée, le progrès technique permet de dématérialiser la production, et donc de réduire la pollution, ce qui est favorable à l'environnement. Mais ce progrès réduit aussi les coûts d'extraction, ce qui augmente les profits et stimule la croissance et la pollution, ce qui est négatif pour l'environnement. Les simulations montrent que le deuxième effet (qualifié d'*effet "rebond"*) l'emporte sur le premier, et que la dégradation de l'environnement est d'autant plus forte que le potentiel de progrès est élevé.

Si les paramètres mesurant la propension à épargner et la sensibilité à l'environnement sont assez élevés, un progrès technique trop élevé peut déstabiliser le système et le conduire vers une issue catastrophique.

Le modèle utilisé ici est très schématique, que ce soit sur le plan économique ou écologique. Il serait intéressant de tester la validité des résultats dans des cadres plus riches. Une première piste serait d'endogénéiser le progrès technique, en le rendant en particulier dépendant de l'activité économique. Une deuxième piste serait d'introduire la possibilité pour les firmes de recycler (au moins une partie) des déchets produits par l'activité humaine, ce qui se développe en pratique de plus en plus. Une troisième serait d'introduire explicitement la population, ce qui permettrait de distinguer les conséquences d'éventuels dépassements sur l'activité économique d'une part, sur la population de l'autre. Une autre serait d'introduire un régulateur susceptible de modifier le comportement des agents, notamment au niveau de la gestion de la ressource "noble". De nombreuses possibilités d'enrichissement existent également du point de vue écologique. Enfin, tout un travail intéressant pourrait également être réalisé au niveau de la calibration du modèle.

7 Bibliographie

Akao K.-I. and S. Managi (2007), "Feasibility and optimality of sustainable growth under materials balance", *Journal of Economic Dynamics & Control*, 31.

Bencheikroun H. et A. Chaudhuri (2011), "The 'voracity effect' and climate change: the impact of clean technologies", Nota di lavoro 05.2011, Fondazione ENI Enrico Mattei.

¹²Je suis redevable à J.-F. Fagnart d'avoir attiré mon attention sur ce point.

- Bois G. (2000), *La grande dépression médiévale : XIVe et XVe siècles. Le précédent d'une crise systémique*, Presse Universitaire de France.
- Brander J. et M.S. Taylor (1998), "The simple economics of Easter Island : a Ricardo-Malthus model of renewable resource use", *American Economic Review*, 88.
- Diamond J. (2006), *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Gallimard.
- Fagnart J.-F. et M. Germain (2010), "Quantitative versus qualitative growth with recyclable resource", *Ecological Economics*, à paraître.
- Germain M. (1991), "Le principe de conservation de la matière dans le cadre du modèle de Harrod-Domar", *Revue Economique*, vol. 42, n°5.
- Krysiak F. and D. Krysiak (2003), "Production, consumption, and general equilibrium with physical constraints", *Journal of Environmental Economics and Management*, 46.
- Krysiak F. (2006), "Entropy, limits to growth, and the prospects for weak sustainability", *Ecological Economics*, 58(1).
- Meadows D., J. Randers et D. Meadows (2004), *Limits to growth. The 30-year update*, Chelsea Green Publishing Company.
- Odum H. (2005) "Microbial simulation with TRUEBASIC", [www.emergysystems.org/downloads/TrBASIC_Models\(Win\).zip](http://www.emergysystems.org/downloads/TrBASIC_Models(Win).zip)
- Pillet G. et H. Odum (1987), *Energie, Ecologie, Economie*, Georg Editeur, Genève.
- Taylor S. (2009), "Environmental crises. Past, present and future", *Canadian Journal of Economics*, 42(4).

Institut de Recherches Économiques et Sociales
Université catholique de Louvain

Place Montesquieu, 3
1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

